

RESISTENCIA RESIDUAL DE SUELOS NO SATURADOS UTILIZANDO UN APARATO DE CORTE DE ANILLO A SUCCIÓN CONTROLADA¹

Laureano R. Hoyos² y Claudia L. Velosa³

Resumen: La evaluación correcta de los parámetros de resistencia residual al corte de suelos no saturados, bajo esfuerzos normales y estados de succión matricial relativamente bajos, es de suma importancia en el análisis de estabilidad de taludes, especialmente aquellos donde se puedan presentar fallas superficiales inducidas por fuertes lluvias a grados relativamente altos de saturación. Sin embargo, a la fecha, la información al respecto es muy escasa, en particular pruebas experimentales realizadas en suelos sometidos a grandes deformaciones bajo estados de succión controlada. En el presente trabajo, una serie completa de ensayos de corte de anillo a succión controlada fueron realizados sobre muestras estáticamente compactadas de arena limo-arcillosa. Los ensayos fueron realizados en un novedoso aparato de corte de anillo, totalmente computarizado, el cual es idóneo para ensayar suelos a succión matricial controlada utilizando la técnica de traslación de ejes. Los resultados confirman la influencia significativa ejercida por el estado de succión matricial en la resistencia residual al corte de suelos no saturados.

Palabras clave: ensayo de corte de anillo, resistencia residual al corte, succión matricial, suelos no saturados.

RESIDUAL STRENGTH OF UNSATURATED SOILS USING A FULLY SERVO/SUCTION-CONTROLLED RING SHEAR APPARATUS

Abstract: Assessment of residual shear strength parameters of unsaturated soils, at relatively low net normal stresses and matric suction states, is of critical importance in slope stability analyses that involve potentially shallow failures triggered by rainfall at relatively high degrees of saturation. To date, however, there is very limited experimental evidence of soil behavior under large deformations, and their corresponding residual shear strength properties, for soils subjected to controlled-suction states. In this work, a full series of suction-controlled ring shear tests were conducted on several statically compacted samples of clayey silty sand. The tests were accomplished in a newly developed servo/suction-controlled ring shear apparatus that is suitable for testing soils via axis-translation technique. Results reflect the important role played by matric suction on residual shear strength properties of unsaturated soils.

Keywords: matric suction, residual shear strength, ring shear testing, unsaturated soils.

INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de la infraestructura geotécnica en el mundo está conformada por suelos compactados o construida sobre depósitos de suelos que permanecen en condiciones parcialmente saturadas a través de todo el año. Este tipo de construcciones civiles puede estar sujeto a un amplio rango de deformaciones. El cálculo de asentamientos en fundaciones superficiales, por ejemplo, requiere de una evaluación correcta de la rigidez del suelo bajo deformaciones relativamente pequeñas. Por otro lado, el análisis de estabilidad de taludes de tierra y terraplenes, y la capacidad de carga de fundaciones, requieren de un estimado razonable de la resistencia al corte de los suelos, incluyendo su resistencia residual.

La evaluación de los parámetros de resistencia residual al corte de suelos no saturados, sometidos a esfuerzos normales y estados de succión matricial relativamente bajos, es de suma importancia en el análisis de estabilidad de taludes de tierra, especialmente aquellos donde se puedan presentar fallas superficiales inducidas por fuertes lluvias a grados relativamente altos de saturación. Sin embargo, a la fecha, la información al respecto es muy escasa, en particular pruebas experimentales realizadas en suelos sometidos a grandes deformaciones bajo estados de succión matricial controlada. Es precisamente en este contexto donde un aparato de corte de anillo ("ring shear apparatus"), a succión matricial controlada, juega un papel fundamental en la debida caracterización de este tipo de materiales.

¹ Artículo recibido el 8 de setiembre de 2011 como parte del 2do Encuentro Latino de Profesores de Geotecnia. Artículo aceptado en versión final el 15 de noviembre de 2011.

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Texas en Arlington, Arlington, Texas 76019, USA. E-mail: lhoyos@uta.edu

³ Ingeniero Residente, Fugro Geoconsulting, Houston, Texas 77081, USA. E-mail: clilianav@hotmail.com

Los escasos esfuerzos que se han realizado en la materia, incluyendo los trabajos de Vaunat et al. (2006) y de Infante Sedano et al. (2007), se han enfocado en la adaptación de aparatos convencionales del tipo “Bromhead” (Bromhead, 1979), ya existentes en sus respectivos laboratorios, para ensayos de suelos no saturados a través de las técnicas de transferencia de vapor o traslación de ejes, respectivamente. A pesar de las importantes observaciones derivadas de dichos trabajos, los cuales resaltan la influencia ejercida por el estado de succión matricial en el comportamiento residual de suelos arcillosos, los resultados no son del todo concluyentes, justificando ellos mismos esfuerzos adicionales en la materia.

En el presente trabajo, una serie completa de ensayos de corte de anillo fueron realizados sobre muestras estáticamente compactadas de arena limo-arcillosa sometidas a estados relativamente bajos de succión matricial controlada (0-100 kPa). Los ensayos fueron realizados en un novedoso aparato de corte de anillo, totalmente computarizado, el cual es idóneo para ensayar suelos a succión controlada utilizando la técnica de traslación de ejes (Hilf, 1956; Fredlund y Rahardjo, 1993). Una descripción detallada del diseño de dicho equipo, incluyendo sus componentes principales, implementación y el respectivo proceso de calibración, fue presentada por Velosa (2011) y por Hoyos et al. (2011).

APARATO DE CORTE DE ANILLO A SUCCIÓN CONTROLADA

El aparato de corte de anillo utilizado en este trabajo permite la aplicación monotónica de cargas verticales hasta de 8 kN, cargas de torque de hasta 113 N·m y rotaciones angulares ilimitadas. Consiste de tres módulos principales: (1) Celda principal con accionador neumático para cargas normales, y actuador rotativo y electro-mecánico para cargas de torque; (2) Sistema de control y adquisición de datos para el cálculo en tiempo real de esfuerzos normales y cortantes, y promedios de desplazamientos lineales y angulares; y (3) Panel de presión modelo PCP-15U para el control de succión matricial a través de la técnica de traslación de ejes.

Los siguientes pasos resumen el protocolo típico a seguir en el montaje de la muestra y ensamblaje general del equipo:

1. Una pequeña muestra de papel filtro es colocada sobre cada uno de los discos cerámicos, antes de compactar la muestra, con el objeto de asegurar la continuidad de fases entre el agua intersticial en los poros de la muestra y el agua contenida en el disco cerámico, previamente saturado: Figura 1(a).
2. La muestra de suelo, de 15 mm de espesor, es preparada directamente dentro de la placa anular inferior del aparato por medio del método de compactación estática: Figura 1(b). La placa, con la muestra de suelo compactada, es transferida y asegurada de inmediato al soporte de base de todo el aparato de corte: Figura 1(c).
3. Una vez la placa anular superior se encuentra debidamente alineada sobre la muestra de suelo, una ligera carga de 25 N es aplicada para asegurar el contacto de la muestra con dicha placa superior: Figura 1(c).
4. A continuación, todas las líneas de drenaje y desagüe (“flushing”) son totalmente saturadas con agua destilada con el fin de eliminar las burbujas de aire presentes en cualquiera de estas líneas.
5. La celda principal es fijada al soporte de base mientras la cubierta superior de la celda se asegura a las paredes de la misma: Figura 1(d). La presión de aire en los poros de la muestra, u_a , es controlada a través de una línea proveniente del panel de presión PCP-15U y conectada luego a la cubierta superior del aparato: Figura 1(d).
6. La muestra es sometida entonces a un ensayo de corte de anillo multi-etapa en el cual la succión matricial es controlada por medio de la técnica de traslación de ejes: $s = u_a$ (i.e., $u_w = 0$), donde s es la succión matricial.
7. Finalmente, una vez inducida la falla, el equipo es cuidadosamente desarmado y la superficie de falla minuciosamente analizada con ayuda de imágenes digitales a escala microscópica (Velosa, 2011).



Figura 1: Detalles: (a) placa anular inferior, (b) muestra de suelo, (c) placa anular superior, (d) celda principal.

PROPIEDADES DEL SUELO Y PROCEDIMIENTO GENERAL DE ENSAYO

El suelo utilizado en este trabajo clasifica como una arena limo-arcillosa de baja plasticidad (SC-SM), de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS); con 60% de arena, 34.05% de limo, y 5.95% de arcilla; contenido de humedad óptima de 26% y peso unitario seco máximo, $\gamma_{d\text{-max}} = 1.33 \text{ g/cm}^3$. La fracción fina arroja un valor de límite líquido de 26.4% y un índice de plasticidad de 6.2%. El material fue seleccionado por su baja plasticidad y su gradación uniforme, lo cual ha de reducir al máximo el tiempo requerido para lograr equilibrio de fases en los poros de la muestra (“pore-fluid equalization”) durante los ensayos de corte de anillo a succión matricial controlada. También se espera que el contenido relativamente alto de finos minimice la generación de posibles efectos friccionales (“wall-friction effects”) entre la muestra de suelo y los anillos concéntricos del aparato. Las muestras fueron todas preparadas a un peso unitario seco correspondiente al 95% del $\gamma_{d\text{-max}}$.

La primera etapa de un ensayo típico de corte de anillo a succión controlada consiste en inducir en la muestra de suelo un estado inicial de esfuerzo normal neto, $(\sigma_n - u_a) = 25 \text{ kPa}$, con una correspondiente succión matricial, $s = 25, 50, \text{ ó } 100 \text{ kPa}$. En primera instancia, una carga vertical es aplicada monotónicamente, por medio de la placa anular superior, hasta lograr un valor superior en 25 kPa al valor deseado de succión matricial. Una vez la muestra se ha consolidado bajo esta carga inicial, la presión de aire en los poros de la muestra es incrementada, como se muestra en la Figura 1(d), hasta lograr el valor deseado de succión matricial, $s = u_a = 25, 50, \text{ ó } 100 \text{ kPa}$. Durante este proceso, la carga vertical inicial se ajusta lo necesario para mantener constante el esfuerzo normal neto, $(\sigma_n - u_a) = 25 \text{ kPa}$. El tiempo requerido para lograr equilibrio de fases en los poros de la muestra puede variar entre 74 y 116 horas, dependiendo del valor de succión a ser inducido.

Un total de cuatro ensayos de corte de anillo fueron realizados sobre igual número de muestras compactadas de suelo SC-SM, bajo condiciones saturadas ($s = 0$) o de succión matricial controlada ($s = 25, 50, \text{ ó } 100 \text{ kPa}$). Una vez logrado el equilibrio de fases en los poros de la muestra, como se ha explicado en el párrafo anterior, la muestra es sometida a un corte de anillo multi-etapa en el cual la resistencia residual es evaluada bajo tres o más niveles distintos de esfuerzo normal neto, $(\sigma_n - u_a) = 25, 50, 75, 100, \text{ ó } 200 \text{ kPa}$. En cada etapa, el corte de anillo se suspende una vez que resulte evidente que se ha conseguido un estado de esfuerzo de corte puramente residual.

Todos los ensayos de corte de anillo fueron realizados a una razón de desplazamiento equivalente horizontal de 0.025 mm/min, lo cual corresponde a una velocidad rotacional de corte de 0.023°/min. Esta velocidad es ligeramente inferior a la recomendada en ensayos de corte de anillo sobre suelos arcillosos saturados (Meehan et al., 2007), o en ensayos de corte de anillo a succión controlada sobre suelos arcillosos o limosos (Vaunat et al., 2006 y 2007).

RESISTENCIA RESIDUAL DE SUELO COMPACTADO TIPO SC-SM

Los ensayos de corte de anillo multi-etapa, como fueron descritos en la sección anterior, sólo permiten la evaluación del esfuerzo máximo (“peak stress”) durante la primera etapa de corte, es decir, bajo un esfuerzo normal neto inicial de 25 kPa. La Figura 2 muestra los resultados obtenidos durante la primera etapa de corte bajo estados de succión matricial controlada, $s = 0, 25, 50, \text{ y } 100 \text{ kPa}$; todas ellas realizadas a esfuerzo normal neto, $(\sigma_n - u_a) = 25 \text{ kPa}$. Como se puede observar, todas las muestras exhiben un incremento sostenido en el esfuerzo de corte hasta alcanzar un valor máximo, el cual es seguido por una disminución gradual de dicho esfuerzo hasta un estado virtualmente residual. Como era de esperarse, el punto máximo en la curva esfuerzo-desplazamiento es mucho más pronunciado a un mayor valor de succión matricial. También se puede corroborar el efecto significativo que la succión matricial ejerce sobre la resistencia residual al corte del suelo compactado tipo SC-SM, con un incremento considerable bajo un estado inducido de succión matricial, $s = 100 \text{ kPa}$.

La Figura 3 ilustra el efecto ejercido por la succión matricial sobre la posición y pendiente de todas las envolventes de falla residuales obtenidas para suelo compactado tipo SC-SM. Se puede observar que la posición final de las envolventes depende esencialmente del estado de succión matricial inducido en el suelo, con una posición considerablemente elevada bajo un estado inducido de succión matricial, $s = 100 \text{ kPa}$. La succión matricial también ejerce una gran influencia sobre el valor de cohesión aparente residual, cuyo valor más bajo (17.5 kPa) corresponde a condiciones totalmente saturadas ($s = 0$). Estudios previos sobre suelos limosos y limo-arenosos han reportado valores de cohesión aparente residual entre 5 y 15 kPa en condiciones totalmente saturadas (e.g., Tiwari and Marui, 2004). Por otro lado, dentro del rango de esfuerzos normales y estados de succión matricial considerados en este trabajo, las envolventes de falla residuales resultan prácticamente lineales y paralelas entre sí, con coeficientes de determinación que varían entre $R^2 = 0.954$ y $R^2 = 0.999$.

La Figura 4 ilustra la influencia ejercida por el esfuerzo normal neto sobre la posición y tendencia de las envolventes de falla residuales, una vez estas han sido proyectadas sobre un plano de esfuerzo-de-corte-residual versus succión-matricial. Los resultados muestran un alto grado de no linealidad de las envolventes con respecto a la succión matricial. En este caso, los resultados experimentales han sido ajustados con sendas regresiones polinómicas de segundo orden, cuyos coeficientes de determinación varían entre $R^2 = 0.985$ y $R^2 = 1.0$. También se aprecia que el grado de no linealidad en las envolventes es mucho más pronunciado cuanto mayor es el valor de succión matricial inducido.

Estos resultados parecen confirmar la correlación directa que existiría entre la naturaleza no lineal de los envolventes de falla residuales y la curva característica del suelo (“soil-water characteristic curve”). En efecto, en un régimen de succiones relativamente bajas, antes de exceder el valor de entrada de aire del propio suelo (“air-entry value”, de aproximadamente 30 kPa en el suelo compactado tipo SC-SM), los poros del suelo permanecen prácticamente saturados y la envolvente de falla es virtualmente lineal. Sin embargo, en la medida en que la succión matricial se incrementa, la correspondiente reducción de volumen de agua en los poros de la muestra resulta en una menor contribución de la succión a la resistencia al corte del suelo ensayado, tal y como se observa en la Figura 4. Este efecto es mucho más pronunciado a mayor esfuerzo normal neto.

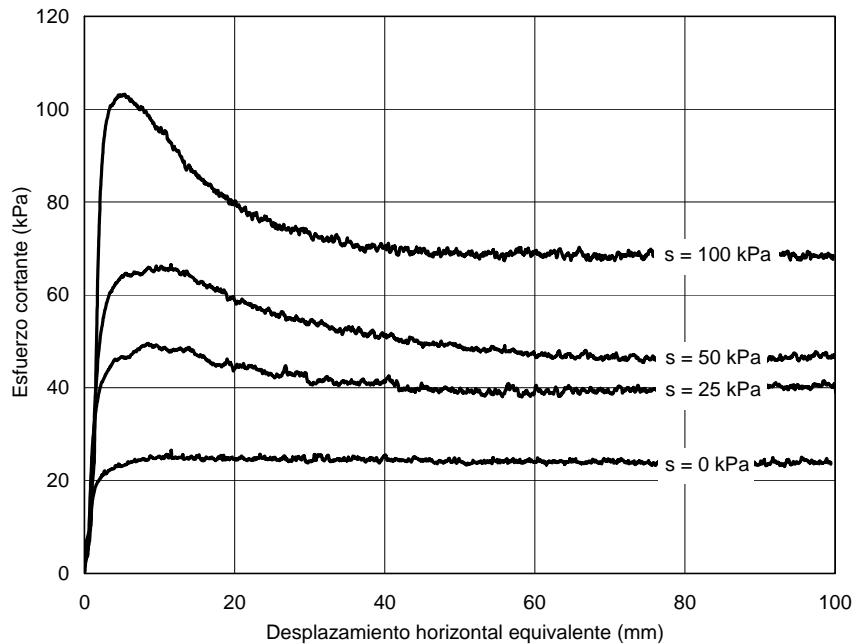


Figura 2: Resultados de ensayos de corte de anillo bajo esfuerzo normal neto, $(\sigma_n - u_a) = 25$ kPa.

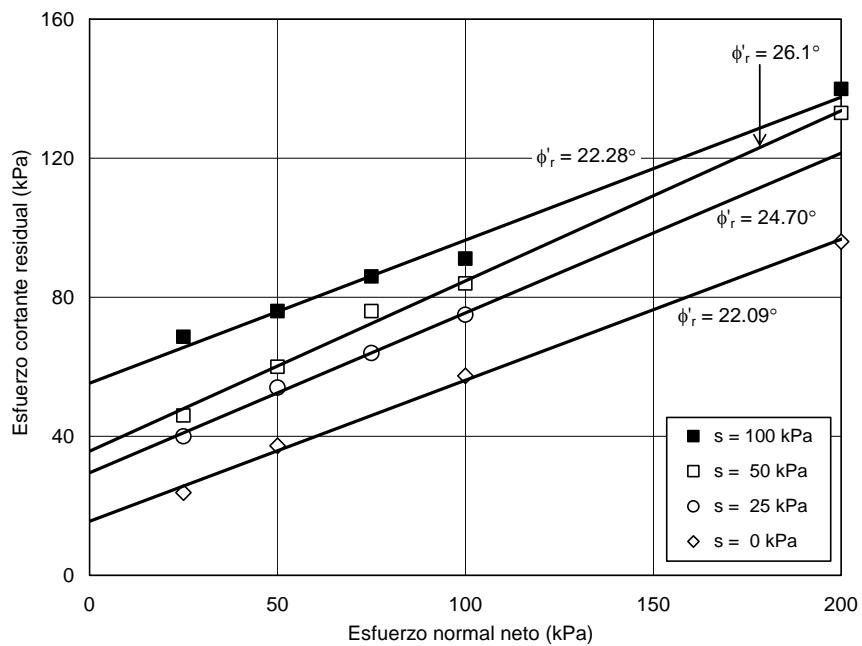


Figura 3: Envolventes de falla residual: efecto de la succión matricial.

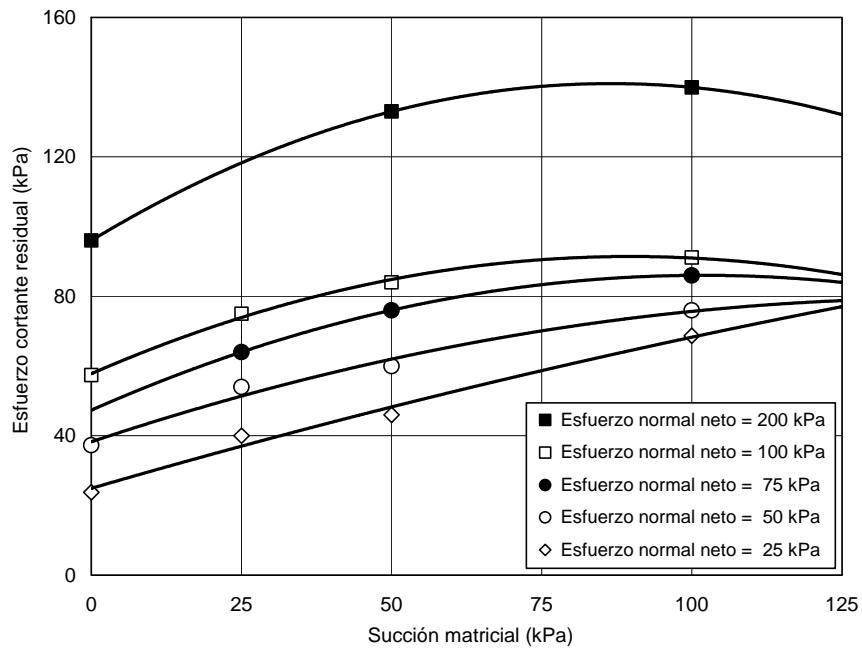


Figura 4: Envolventes de falla residual: efecto del esfuerzo normal neto.

SUPERFICIE DE FALLA INDUCIDA POR CORTE DE ANILLO

La Figura 5 exhibe algunos de los rasgos más prominentes de una superficie de falla típica inducida por corte de anillo en suelo compactado tipo SC-SM. La Figura 5(a) muestra una imagen digital microscópica de la superficie superior del suelo inmediatamente después de compactado (50x de magnificación). De igual modo, la Figura 5(b) muestra una imagen digital microscópica de una superficie de falla típica inducida por corte de anillo, la cual se caracteriza por ser lisa, pulida y brillosa, indicando una clara re-orientación de los minerales arcillosos presentes en la muestra a lo largo del plano de falla.

Por otro lado, en la mayoría de los casos una minuciosa inspección de las placas anulares superior e inferior una vez inducida la superficie de falla, ha corroborado que la falla de corte se produce a unos 2 mm dentro del espesor original de la muestra, como se ilustra en las Figuras 5(c) y 5(d). Es preciso anotar que la superficie inferior porosa de la placa anular superior, con la cual se aplica el esfuerzo de torque sobre la muestra, es mucho más rugosa que la utilizada en un aparato de corte de anillo convencional tipo “Bromhead”.



Figura 5: Características de superficie de falla típica inducida por corte de anillo.

OBSERVACIONES FINALES

En este trabajo se realizaron una serie completa de ensayos de corte de anillo a succión controlada sobre muestras estáticamente compactadas de arena limo-arcillosa: suelo tipo SC-SM. Todos los ensayos fueron realizados en un novedoso aparato de corte de anillo, totalmente computarizado, el cual es idóneo para ensayar suelos a succión matricial controlada utilizando la técnica de traslación de ejes.

Los resultados experimentales confirman la influencia significativa ejercida por el estado de succión matricial en la resistencia residual al corte de suelos no saturados, lo cual es de suma importancia en el análisis de estabilidad de taludes de tierra y terraplenes, especialmente aquellos donde se puedan presentar fallas superficiales inducidas por fuertes lluvias a grados relativamente altos de saturación.

Los resultados también sugieren que eventualmente se podría concebir un marco conceptual, respecto de la resistencia residual al corte en suelos no saturados, similar al postulado respecto de la resistencia máxima (Fredlund et al., 1978), en la medida en que se vayan realizando trabajos adicionales en la materia, sobretodo a nivel experimental.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el patrocinio brindado por la Fundación Nacional de Ciencias (“National Science Foundation”) de los Estados Unidos de Norteamérica, Proyecto No. CMS-062609, para la realización del presente trabajo investigativo. Los autores también agradecen el apoyo técnico suministrado por el Dr. Manuel Padilla y los señores Peter Goguen y Tamas Vicsocsean, de la compañía “Geotechnical Consulting and Testing Systems”, de Tempe, Arizona, USA, fabricante del sistema esencial del aparato de corte de anillo utilizado en esta investigación.

REFERENCIAS

- Bromhead, E.N. (1979). “A simple ring shear apparatus”, *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 40-44.
- Fredlund, D.G. y Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley and Sons, New York.
- Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. y Widger, R.A. (1978). “The shear strength of unsaturated soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 313-321.
- Hilf, J.W. (1956) “An Investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soils”, Technical Memorandum No. 654, U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Reclamation, Design and Construction Division, Denver, Colorado.
- Hoyos, L.R., Velosa, C.L. y Puppala, A.J. (2011). “A servo/suction-controlled ring shear apparatus for unsaturated soils: Development, performance, and preliminary results,” *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 34, No. 5, pp. 413-423.
- Infante Sedano, J.A., Vanapalli, S.K. y Garga, V.K. (2007). “Modified ring shear apparatus for unsaturated soil testing”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 30, No. 1, pp. 1-9.
- Meehan, C.L., Brandon, T.L. y Duncan, J.M. (2007). “Measuring drained residual strength in the Bromhead ring shear”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 30, No. 6, pp. 1-8.
- Tiwari, B. y Marui, H. (2004). “Objective oriented multistage ring shear test for shear strength of landslide soil”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 2, pp. 217-222.
- Vaunat, J., Merchán, V., Romero, E. y Pineda, J. (2007). “Residual strength of clays at high suctions”, en: Theoretical and Numerical Unsaturated Soil Mechanics, *Proceedings of the Second International Conference of Unsaturated Soils*, Weimar, Germany, pp. 151-163.
- Vaunat, J., Amador, C., Romero, E. y Djerem-Maigre, I. (2006). “Residual strength of a low plasticity clay at high suctions”, *Proceedings of the Fourth International Conference of Unsaturated Soils*, Carefree, Arizona, Vol. 1, pp. 1279-1289.
- Velosa, C.L. (2011). “Unsaturated soil behavior under large deformations using a fully servo/suction-controlled ring shear apparatus,” Ph.D. Dissertation, University of Texas at Arlington, Texas, 192 pp.